第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

阿克苏地区植被生态质量时空变化及其驱动机制

方 贺[1,2]， 严佩文[2,3]， 石 见[2,4]， 康 娟[2]， 刘海蓉[2]，
陈 丹[2]， 罗 继[2]， 徐 栋[5]

（1. 浙江省气候中心，浙江 杭州 310017；2. 阿克苏地区气象局，新疆 阿克苏 843000；
3. 绍兴市气象台，浙江 绍兴 312000；4. 诸暨市气象局，浙江 诸暨 311800；
5. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室，北京 100875）

摘 要：植被生态质量是评价陆地生态系统的重要指标，如何使用遥感技术研究植被质量状况时空演变规律对生态文明建设具有重要的参考价值。阿克苏地区作为我国典型的气候变化敏感区与生态环境脆弱区，研究其植被生态状况具有重要的现实意义。本文结合多源遥感数据与气象观测资料，探究了阿克苏地区2000—2021年生长季5—9月植被生态质量时空变化及其对气候变化与人类活动的响应。结果表明：(1) 2000—2021年，阿克苏地区植被覆盖度、植被净初级生产力呈上升趋势，植被"绿度"显著提升;(2) 2000—2021年，阿克苏地区植被生态质量呈稳步上升趋势，且绿洲边缘荒漠、裸地区域植被生态质量上升区域面积显著扩张；(3) 阿克苏绝大部分地区的植被生态质量指数(VEQI)变化的主导因素为人类活动，而仅在温宿县北部等小部分区域，气候变化主导了VEQI的变化。本文利用多个植被生态参数分析了阿克苏地区近22 a植被生态质量时空变化及其驱动因素，可为地区生态文明建设提供数据基础和技术支撑。

关键词：净初级生产力；植被覆盖度；植被生态质量；时空分布；阿克苏地区

植被生态质量是维护生物多样性稳定的重要物质基础，对生态系统的平衡与自我修复具有重要意义[1]。全球植被呈现显著的绿化趋势，且中国对其贡献了近25%，贡献比例居首[2]。其中，不乏西北地区生态治理工程所带来的效益。西北部地区是我国荒漠化、沙化土地分布最广的地区，近些年持续的生态治理工作给该地区带来了"绿色"[3]。

阿克苏地区地处塔克拉玛干沙漠北缘，受沙漠气候影响较大，是新疆风沙策源地之一，是抗击土地荒漠化、盐渍化的最前沿。作为我国典型的气候变化的敏感区与植被生态环境的脆弱区，阿克苏地区近几十年的植被生态质量受到气候变化与人类活动的共同影响[4]。研究表明，近50 a来，中国阿克苏地区的平均气温呈现出显著的上升趋势，而年降水量则呈现显著下降趋势，导致干旱区逐渐扩大，给地区的生物多样性维护带来了巨大威胁[5-6]。另一方面，近几十年以阿拉尔市、阿克苏市为主的阿克苏地区城市化发展促进了建设用地的大规模扩张，深刻影响着地区的生态系统服务[7]。因此，探究阿克苏地区植被生态质量的时空变化规律及其对气候变化与人类活动的响应，对该地区的生态文明建设具有重要意义[8]。

卫星遥感调查具有视域广、视点高、数据采集快和连续、重复观察的特点，已成为人类获取地表信息的最重要手段之一[9]。近些年，遥感传感器的快速发展以及对地观测系统的逐步完善极大地推动了大尺度地区的植被生态监测研究[10]。净初级生产力(Net Primary Productivity，NPP)和植被覆盖度作为表征陆地生态系统服务功能以及植被生态质量和植物生长状况的2个关键参数[11-12]，常被学

收稿日期：2021-12-29； **修订日期**：2022-03-01
基金项目：浙江省气象局科技计划项目(2021YB07, 2019QN19, 2021YB34)；浙江省自然科学基金(LQ21D060001)；风云卫星先行计划(FY-APP-2021.0105)；中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J040)；卫星海洋环境动力学国家重点实验室资助项目(QNHX2222)；新疆气象局科技创新发展基金项目(MS202128)；阿克苏地区气象局科技项目(AkS202210)；阿克苏地区政策性农业保险气象灾害评估技术研究(YD202224)
作者简介：方贺(1990-)，男，博士，高级工程师，主要从事植被生态遥感研究. E-mail: fanghe_doc@163.com
通讯作者：徐栋. E-mail: xd@mail.bnu.edu.cn

者们用于地区的植被生态质量评价。一方面,作为衡量地球生态系统源和碳汇重要因子,植被NPP表征了生态系统植被在自然条件下的生产潜力[13]。从早期的站点观测发展到目前大尺度甚至全球尺度的模型估算,植被NPP的研究取得了长足的发展。其中,基于遥感卫星资料和气象观测数据的方法已经成为获取大尺度范围植被NPP的主要途径[14-15]。另一方面,作为表征陆地生态系统状态的另一重要参数,植被覆盖度的测量方法主要分为地面测量法和遥感反演法,其中遥感反演法具有空间连续、监测范围广、经济成本低等优点,广泛应用于大范围植被覆盖度的监测[16-18]。

目前,基于植被NPP与植被覆盖度的植被生态质量评估模型已经取得了很好的发展。例如,毛留喜等[19-20]和钱拴等[21]利用植被NPP构建了用于生态气象监测评价指数模型,为开展生态气象监测探索了一个较好的方法;吴宜进等[22]选取植被覆盖度、叶面积指数、热度等5项指标,并利用主成分分析法评估了西藏地区植被生态质量,研究结果表明2000—2016年西藏地区植被生态质量总体呈现变好的趋势;杨绘婷等[23]利用植被覆盖度指数和遥感生态指数来评估武夷山国家自然保护区植被生态质量的变化,结果显示1979—2017年保护区的植被生态质量和覆盖度均呈上升趋势。

目前,针对阿克苏地区植被生态状况,学者们也开展了一些研究。例如,崔灿等[24]基于AVHRRI和MODIS 2种NDVI数据集,对新疆1989—2017年荒漠植被的时空分布变化及其驱动因素进行分析,表明新疆荒漠植被总面积呈显著增加趋势;王志成等[25]利用2005—2016年Landsat TM和高分1号遥感影像,采用NDVI像元二分模型和差值运算方法,对阿克苏流域的植被覆盖动态进行了监测分析和评价,表明阿克苏流域近10 a植被覆盖度整体呈良性发展趋势,且植被覆盖度不均,差异较大。然而,研究发现利用单一植被覆盖度或NPP对某一区域植被生态质量进行评价,其结果往往缺乏客观性,会出现植被覆盖度相同、NPP不同或NPP相同、植被覆盖度不同等情况。

钱拴等[26]利用中国区域MODIS月NDVI合成数据和逐日气象观测站资料,通过反演得出植被NPP和覆盖度构建了一种可以综合反映植被NPP和覆盖度的VEQI模型。因此,考虑到长期以来针对阿克苏地区植被生态质量状况的研究仅是基于单一要素进行的,缺乏结合植被覆盖度和植被NPP对植被生态质量指数进行动态监测,本研究基于钱拴等[26]提出的VEQI模型,探究了阿克苏地区2000—2021年植被生态质量的时空变化特征及其对气候因子与人类活动的响应,对阿克苏地区甚至全国其他地区的生态文明建设具有重要意义。

1 研究区概况

阿克苏地区地处新疆中部,天山山脉中段南麓,塔里木盆地北部,地理位置位于78°03′~84°07′E,39°30′~42°41′N,全地区总面积13.25×10⁴ km²,全地区辖7县2市,84个乡镇,56个农林牧场。研究区地形呈北高南低的特征,北部坐落着众多山峰,南部覆盖着中国最大的沙漠——塔克拉玛干沙漠。阿克苏市属暖温干旱气候地区,气候干燥、常年缺雨,且蒸发量大,但光照时间较长,年日照时数2800~3000 h,无霜期每年有200~220 d。

2 数据处理和方法

2.1 数据来源

本文使用的卫星遥感资料由中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据库提供,包括2000—2021年Terra/MODIS卫星MOD13Q1数据集中归一化植被指数(NDVI)产品。MOD13Q1数据空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d,产品后期由国家气象卫星中心进行拼接转投影处理,并利用国际通用的最大合成法获取月NDVI数据[27]。将逐月NDVI进行年度均值合成,用于表征本年度植被生长状况。数字高程数据来源于美国地质调查局。同期气象观测资料由阿克苏地区气象局提供。首先选取阿克苏地区2000—2021年5—9月有完整记录的气象观测站逐日气温、降水数据,将各站点日观测要素合成,建立月均值的长时间序列气候要素。

2.2 研究方法

2.2.1 植被NPP遥感估算 采用MODIS NDVI月合成产品和同期气象观测数据,利用国家气象中心提供的陆地生态系统碳通量(Terrestrial Ecosystem Carbon Flux,TEC)模型对柯柯牙工程植被净初级生产力(NPP)进行遥感估算,即

$$\mathrm{NPP} = \mathrm{GPP} - R_a \qquad (1)$$

式中:R_a为自养生物本身呼吸所消耗的同化产物;可由式(2)进行计算:

$$R_a = 1 - (7.825 + 1.145 \times T_a)/100 \tag{2}$$

式中:T_a为月平均气温。

$$GPP = \varepsilon^* \times T_\varepsilon \times W_\varepsilon \times FPAR \times PAR \tag{3}$$

式中:GPP为植被总初级生产力;ε^*为最大光能利用率;T_ε为温度胁迫因子;W_ε为水分胁迫因子;FPAR为植被光合作用吸收的光合有效辐射比;公式中各参数计算方法和取值可参考TEC模型。

2.2.2 *植被覆盖度估算* 植被覆盖度(FVC)利用MODIS NDVI月合成数据,根据混合像元分解法进行计算,表达式如下:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \tag{4}$$

式中:$NDVI_{soil}$表示像元为纯裸土时的归一化植被指数;$NDVI_{veg}$表示像元为纯植被时的归一化植被指数。根据我国植被特点,本研究$NDVI_{soil}$和$NDVI_{veg}$的取值分别为0.05和0.95[11]。

2.2.3 *植被生态质量指数估算* 植被生态质量指数(VEQI)是通过分析植被覆盖度和NPP对某一地区植被生态质量的重要性,采用权重加权的方法构建的一个综合反映植被生态质量的参数[12],可反映植被在单位面积上覆盖能力和生产的综合能力。植被生态质量指数计算公式可表示为:

$$VEQI = 100 \times f_1 \times FVC \times f_2 \times \frac{NPP}{NPP_{max}} \tag{5}$$

式中:f_1和f_2分别表示陆地植被覆盖度和NPP的权重系数,本研究f_1=f_2=0.5;NPP_{max}表示该时段植被NPP的最大值,即当地气象条件最好情况下的陆地NPP。植被生态质量指数数值在0~100,其值越大表示综合了植被生产能力和覆盖能力的植被生态质量越好。

2.2.4 *多元回归残差分析* 气候因子(降水、气温)与人类活动是影响年际间植被生态质量变化的重要因素[28]。本文采用多元线性回归残差分析方法[29-30]探究气候因子与人类活动对VEQI的影响及相对贡献度。该方法包括3个步骤:(1)以气温和降雨栅格数据为自变量,VEQI为因变量,建立多元线性回归模型;(2)基于拟合出的回归模型,以及气温和降雨数据计算出VEQI的模拟值($VEQI_{CC}$),以此来表示气候因子对VEQI的影响;(3)以VEQI残差($VEQI_{HA}$),即VEQI真实值与VEQI模拟值之间的差值来表征人类活动对VEQI的影响。计算公式如下:

$$VEQI_{CC} = a \times T + b \times P + c \tag{6}$$

$$VEQI_{HA} = VEQI_{OBS} - VEQI_{CC} \tag{7}$$

式中:$VEQI_{CC}$为VEQI在气温与降雨影响下的模拟值;T和P分别为气温和降雨;a、b、c为拟合系数;$VEQI_{HA}$为残差;$VEQI_{OBS}$为遥感数据计算出的植被生态质量。

3 结果与分析

3.1 NDVI和植被覆盖度时空变化

2000—2021年阿克苏地区年际植被NDVI呈增长趋势(图1),近22 a全地区年平均植被NDVI以0.024·(10a)$^{-1}$的速率增长,2001年植被NDVI值最低,为0.114。而2021年植被NDVI达近22 a最大值,为0.17,较2000年NDVI(0.12)增长了0.05,增长了42%。2000—2021年阿克苏地区年际植被覆盖度呈上升趋势,平均每年上升约0.25%。其中,2001年的植被覆盖度最低,约8.25%。而2021年植被覆盖度达近22 a最高值,为14.23%,较2000年植被覆盖度(8.75%)增长了63%。

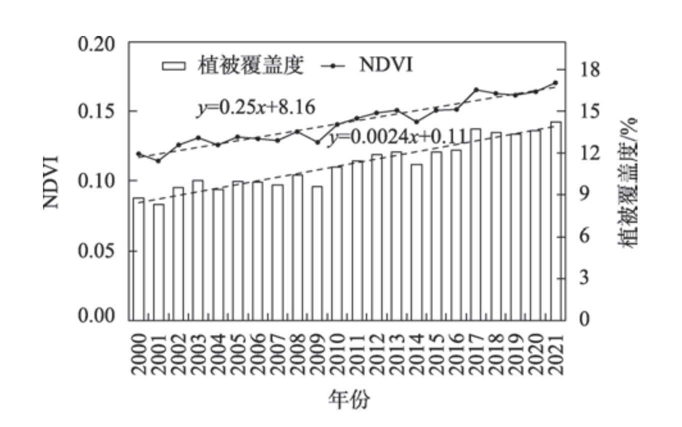


图1 2000—2021年阿克苏地区植被覆盖度和NDVI变化趋势

Fig. 1 Variations of FVC and NDVI in Aksu prefecture from 2000 to 2021

由图2可知,2000—2021年阿克苏地区NDVI均值(/100)的空间分布整体呈增加态势,2021年植被NDVI高值区主要位于阿拉尔市、乌什县中东部、阿瓦提县北部、温宿县南部、拜城县南部以及新和、库车和沙雅三县交界处,其值多在0.5~0.7之间;低值区主要出现在各县市沙漠、裸地和戈壁区域,其值均在0.1以下。

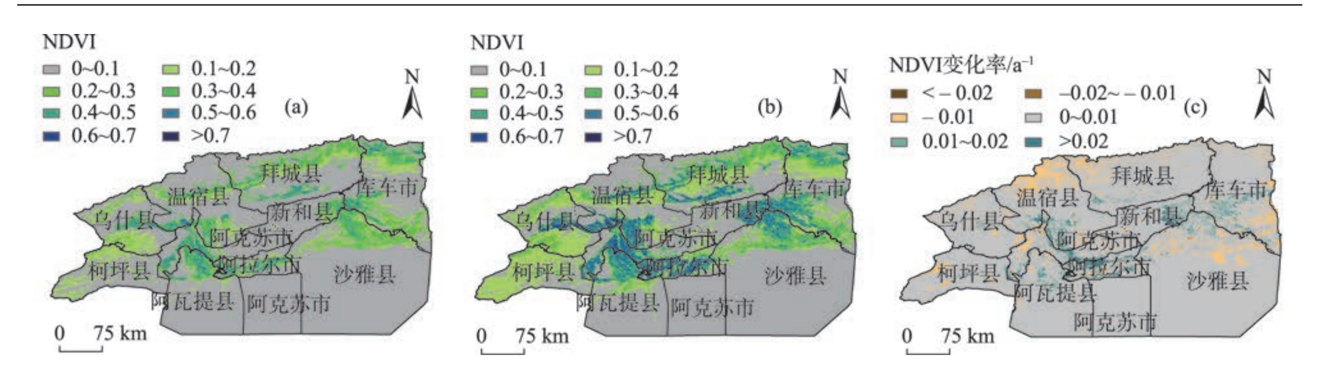


图2 阿克苏地区2000年(a)、2021年(b)植被NDVI均值空间分布与植被NDVI空间变化率分布(c)

Fig. 2 Spatial distribution of the mean value of NDVI in Aksu prefecture in 2000 (a) and 2021 (b), and the spatial variation rate of NDVI during 2000−2021 (c)

图2c为2000—2021年年尺度植被NDVI均值(/100)变化率空间分布，全地区超92%区域面积的植被NDVI呈增长趋势，尤其在温宿县南部、阿拉尔市北部、阿克苏市中部、新和县东部以及库车县中北部区域增长最为明显，年均增长率在1~3(/100)之间。

2000—2021年阿克苏地区地表植被覆盖的空间分布整体呈改善状态(图3)，主要表现为绿洲边缘荒漠、裸地区域缩减，植被覆盖区域明显扩张，同时部分低植被覆盖(<10%)和中低植被覆盖区域(10~30%)植被覆盖度呈明显改善，整个地区中高植被(30%~50%)和高植被(>50%)覆盖地区明显增加。2021年植被覆盖度高值区主要位于阿拉尔市、乌什县中东部、阿瓦提县北部、温宿县南部、拜城县南部以及新和、库车和沙雅三县交界处，覆盖度在40%~60%之间；低值区主要在各县市沙漠、裸地和戈壁区域，覆盖度在5%以下。

2000—2021年植被覆盖度变化率空间分布中超过79%区域面积的植被覆盖度呈增长态势(图3c)，其中温宿县南部、阿拉尔市北部、阿克苏市中部以及新和、沙雅和库车三县交界区域增长最为明显，增长率为2%·a^{-1}~4%·a^{-1}。此外，即使在沙漠区域，近22 a植被覆盖度也表现为增长趋势，但增长趋势较为缓慢，其值在0.5%以下。植被覆盖度下降区域主要位于阿克苏市南部和温宿县北部沙漠区域，平均下降在0%·a^{-1}~2%·a^{-1}。

3.2 植被NPP

植被净初级生产力(NPP)是指绿色植物在单位时间、单位面积上由光合作用所产生的有机干物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分。植被NPP作为表征植被活力的关键变量，不仅是有机体能量和物质循环的基础，也是生态系统能量和物质流动的基础，关系到生态系统对碳固定能力的强弱。2000—2021年阿克苏地区年际植被累加NPP变化呈逐步上升趋势(图4)，平均增长约0.62 g·m^{-2}·a^{-1}。2016年全地区植被累加NPP均值最高，为40.25 g·m^{-2}；2006年最低，为18.64 g·m^{-2}。2021年全地区植被累加NPP均值为29.65 g·m^{-2}，较2000年(19.03 g·

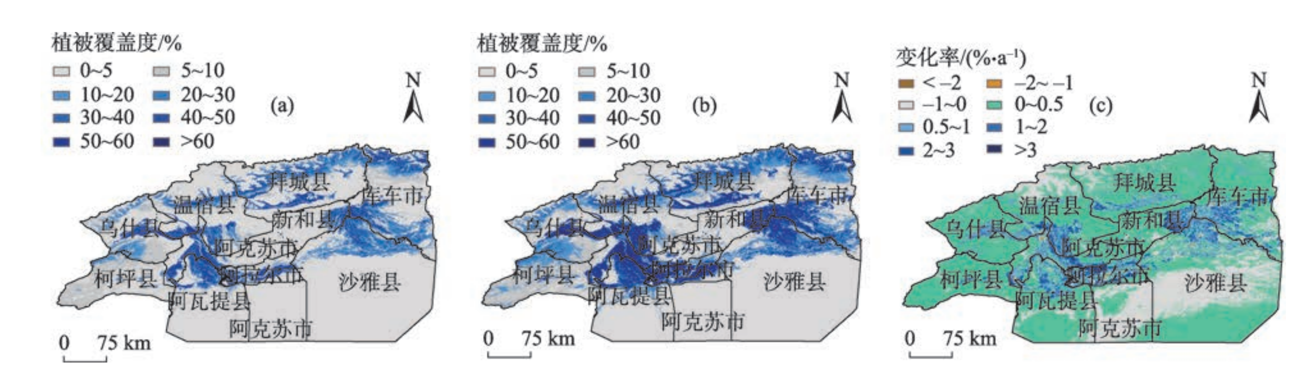


图3 阿克苏地区2000年(a)、2021年(b)植被覆盖度(FVC)空间分布与植被覆盖度空间变化率分布(c)

Fig. 3 Spatial distribution of FVC in Aksu prefecture in 2000 (a) and 2021 (b), and the spatial variation rate of FVC during 2000−2021 (c)

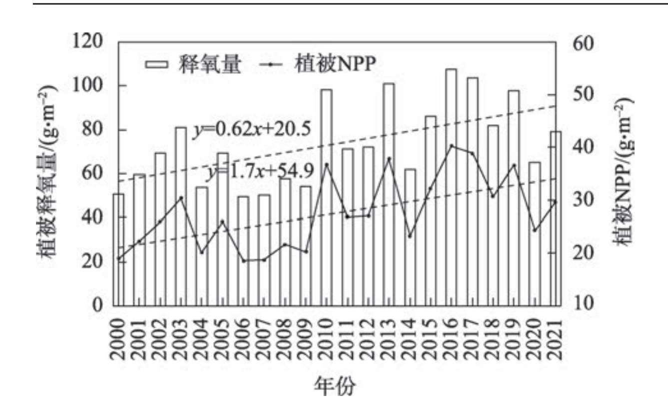


图4　2000—2021年阿克苏地区植被NPP和释氧量变化趋势

Fig. 4　Variation of NPP and-oxygen release in Aksu prefecture from 2000 to 2020

m^{-2})增长了56%。在植被NPP上升的同时,植被释氧量呈1.65 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$的趋势增长。2021年全地区植被释氧量均值为79.16 $g\cdot m^{-2}$,较2000年(50.82 $g\cdot m^{-2}$)增长了56%。

从空间分布看(图5),2000—2021年阿克苏地区植被NPP呈总体改善状态,主要表现为绿洲边缘荒漠、裸地区域植被NPP增加区域面积显著扩张。2000年柯坪县西北部、乌什县南部和拜城县中北部区域植被累加NPP多在0~20 $g\cdot m^{-2}$,2021年上述区域植被NPP增长至20~50 $g\cdot m^{-2}$。2021年,温宿县南部、阿瓦提县北部、阿克苏市北部、拜城县南部以及新和、库车和沙雅三县交界区域植被NPP多在100~200 $g\cdot m^{-2}$之间,拜城县南部部分区域NPP超过100~200 $g\cdot m^{-2}$之间。

由图5c可知,近22 a全地区超过95%区域面积的植被NPP呈增加趋势,温宿县南部、阿拉尔市北部、阿克苏市中部以及新和、沙雅和库车三县交界区域增长最为明显,平均增加1~4 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$。其中,阿拉尔市北部、新和县中部部分区域植被NPP平均可增加5~7 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$。植被NPP降低区域主要在温宿县北部、拜城县北部、库车县东部以及沙雅县北部部分区域,平均下降0~2 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$。

3.3　植被生态质量

植被NPP和覆盖度是反映陆地生态系统服务功能的2个最基本特征量,也是反映植被生态质量的2个关键特征量。但是,无论用植被NPP,还是用植被覆盖度,只能反映陆地生态系统服务功能或植被生态质量的一个方面,即生产能力或覆盖能力。基于植被NPP和覆盖度,构建的植被综合生态质量指数可反映植被在单位面积上生产能力和覆盖能力的综合能力,可解决空间上存在的单位面积上植被NPP相同但对地表的覆盖程度不同或植被覆盖度相同但植被NPP不同的问题。基于此,本文利用以月和年尺度植被覆盖度和NPP,构建了既能反映植被生产力又能反映植被覆盖度的植被综合生态质量指数,建立了植被综合生态质量指数年际对比和多年变化趋势评价模型。

2000—2021年阿克苏地区年际植被生态质量指数变化呈稳步上升趋势(图6),平均每年约增长0.17。2017年全地区植被生态质量达最高值,为9.08;2001年为最低值,为5.41。2021年全地区植被生态质量为8.82,较2000年(5.47)增长了3.35,涨幅达61%,植被生态较优。

从2000年和2021年阿克苏地区植被生态质量空间分布来看(图7),全地区2021年植被生态质量

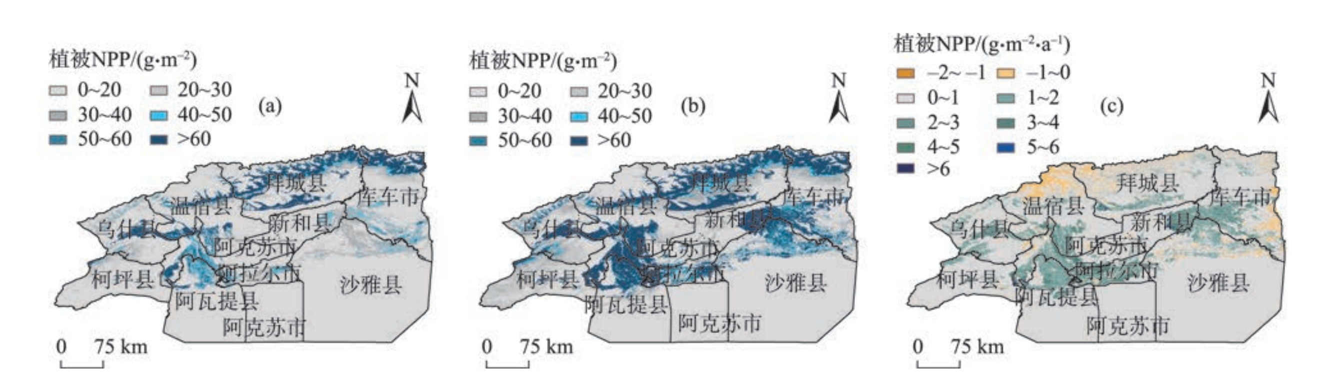


图5　阿克苏地区2000年(a)、2021年(b)年植被净初级生产力空间分布与植被NPP空间变化率分布(c)

Fig. 5　Spatial distribution of NPP in Aksu prefecture in 2000 (a) and 2021 (b), and the spatial variation rate of NPP during 2000–2021 (c)

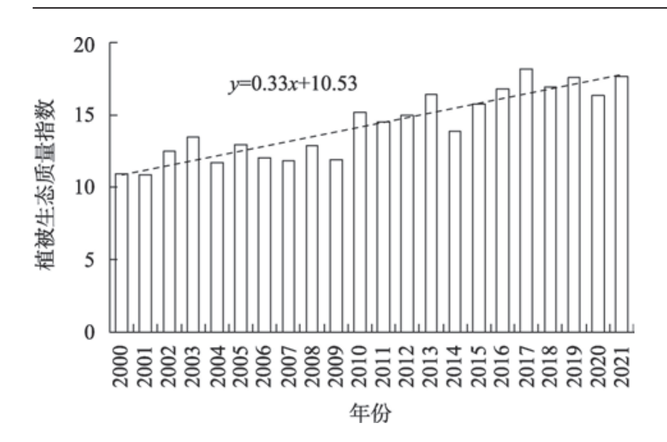


图6 2000—2021年阿克苏地区植被生态质量变化趋势

Fig. 6 Variation of vegetation ecological quality index in Aksu prefecture from 2000 to 2021

较2000年呈明显改善趋势，主要表现为原有绿地面积植被生态质量明显提升。与此同时，绿洲边缘荒漠、裸地区域植被生态质量上升区域面积显著扩张。2021年植被生态质量指数高值区主要位于阿拉尔市、乌什县中东部、阿瓦提县北部、温宿县南部、拜城县南部，其值在40以上；新和、库车和沙雅三县交界区域植被生态质量多在30~40；低值区主要在各县市沙漠、裸地和戈壁区域，植被生态质量多在10以下。

由图7c可知，2000—2021年全地区超过94%区域面积的植被生态质量指数呈增加趋势，其中温宿县南部、阿拉尔市中部以及新和县中部区域增长最为明显，平均每年增加1~2。此外，沙漠和戈壁区域近22 a植被生态质量亦呈增长趋势，但增长趋势较为缓慢，每年多在0~0.5之间。植被生态质量指数下降区域主要位于温宿县北部和库车市东部部分区域，平均每年下降0~2之间。表1所示为2000—2021年阿克苏地区各县(市)植被生态要素均值及变化。

4 讨 论

阿克苏地区属于典型的暖温带干旱型气候，降水稀少、蒸发量大、气候干燥，是新疆风沙策源地之一，也是我国典型的气候变化的敏感区与植被生态环境的脆弱区。植被生态质量的动态变化主要受人类活动与气候变化的共同影响。其中，气候变化尤其是温度、降水，对植被长势具有重要的作用。本研究基于阿克苏地区植被生态质量以及气候因子(温度、降水)数据，并利用多元线性回归残差分析研究了阿克苏地区2000—2021年植被生态质量时空变化对气候变化与人类活动的响应。

从图8a中可以看出，2000—2021年阿克苏地区绝大部分区域的植被生态质量呈现出不变与上升的趋势。从图8b可以看出，人类活动驱动下的VEQI变化趋势与图8a中的VEQI真实变化趋势的空间分布具有较高的一致性，表明2000—2021年阿克苏地区的植被生态质量的变化主导因素为人类活动。由图8c可知，大部分区域的植被生态质量受气候影响的程度均较小。

由8d和图8e可以看出，近20 a阿克苏地区的VEQI变化的主导因素为人类活动。其次，从图8f中也可以看出，阿克苏绝大部分地区的VEQI变化的主导因素为人类活动，而仅在温宿县北部等小部分区域，气候变化主导了VEQI的变化。

2002年国家启动退牧还草工程项目后，阿克苏地区在国家和自治区的大力支持下积极实施生态修复治理工程，在“两山”理论的引领下大力推进生

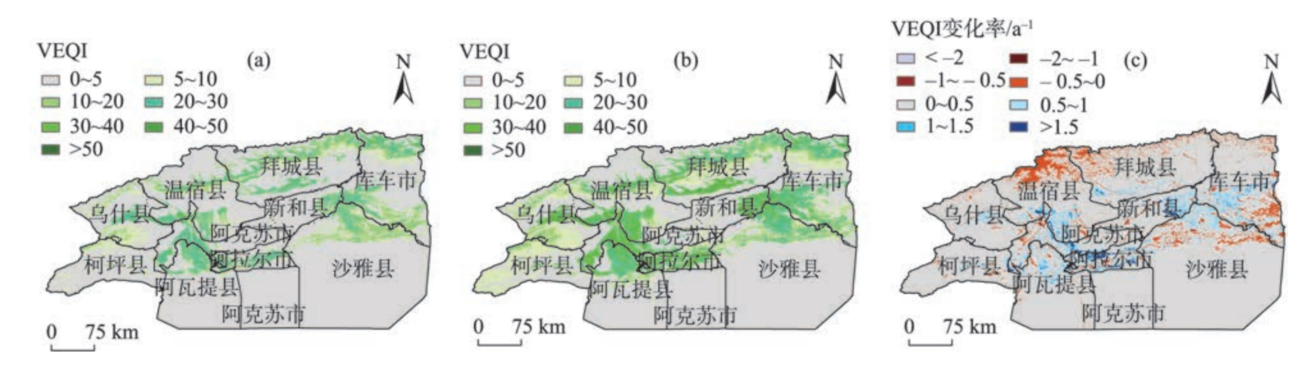


图7 阿克苏地区2000年(a)、2021年(b)年植被生态质量指数空间分布与植被VEQI空间变化率分布(c)

Fig. 7 Spatial distribution of VEQI in Aksu prefecture in 2000 (a) and 2021 (b), and the spatial variation rate of VEQI during 2000-2021 (c)

表1 2000—2021年阿克苏地区植被生态参数变化

Tab. 1 Variation of vegetation ecological parameters from 2000 to 2021 in Akesu prefecture

	2000年均值				2021年均值				2000—2021年变化			
	NDVI	覆盖度/%	NPP /(g·m^{-2})	VEQI	NDVI	覆盖度/%	NPP /(g·m^{-2})	VEQI	NDVI	覆盖度/%	NPP /(g·m^{-2})	VEQI
阿克苏地区地区	0.12	8.75	19.03	5.4	0.17	14.23	29.65	8.82	0.053	5.72	13.56	3.35
阿克苏市	0.09	5.86	11.31	3.59	0.14	11.68	20.51	7.02	0.05	5.51	12.77	3.43
阿拉尔市	0.21	19.15	21.11	10.79	0.39	38.57	45.71	21.92	0.19	21.61	41.21	11.13
阿瓦提县	0.09	6.71	12.81	4.10	0.14	11.22	21.36	6.84	0.05	5.09	14.26	2.74
拜城县	0.15	12.9	36.88	8.57	0.21	18.96	55.83	12.69	0.04	5.03	13.51	4.12
柯坪县	0.1	6.23	17.45	4.12	0.13	9.47	24.5	6.15	0.03	3.52	14.02	2.03
库车市	0.17	14.68	30.68	9.10	0.23	21.6	40.4	13.10	0.07	8.16	17.35	4.00
沙雅县	0.07	4.31	8.2	2.69	0.1	6.59	15.11	4.17	0.02	2.68	6.06	1.48
温宿县	0.13	10.8	22.17	6.68	0.2	18.14	31.79	10.90	0.06	6.87	13.88	4.22
乌什县	0.13	10.66	22.87	6.65	0.19	16.12	33.88	10.01	0.05	5.66	18.07	3.36
新和县	0.10	6.54	13.31	4.04	0.17	14.78	34.3	9.36	0.08	9.22	18.03	5.32

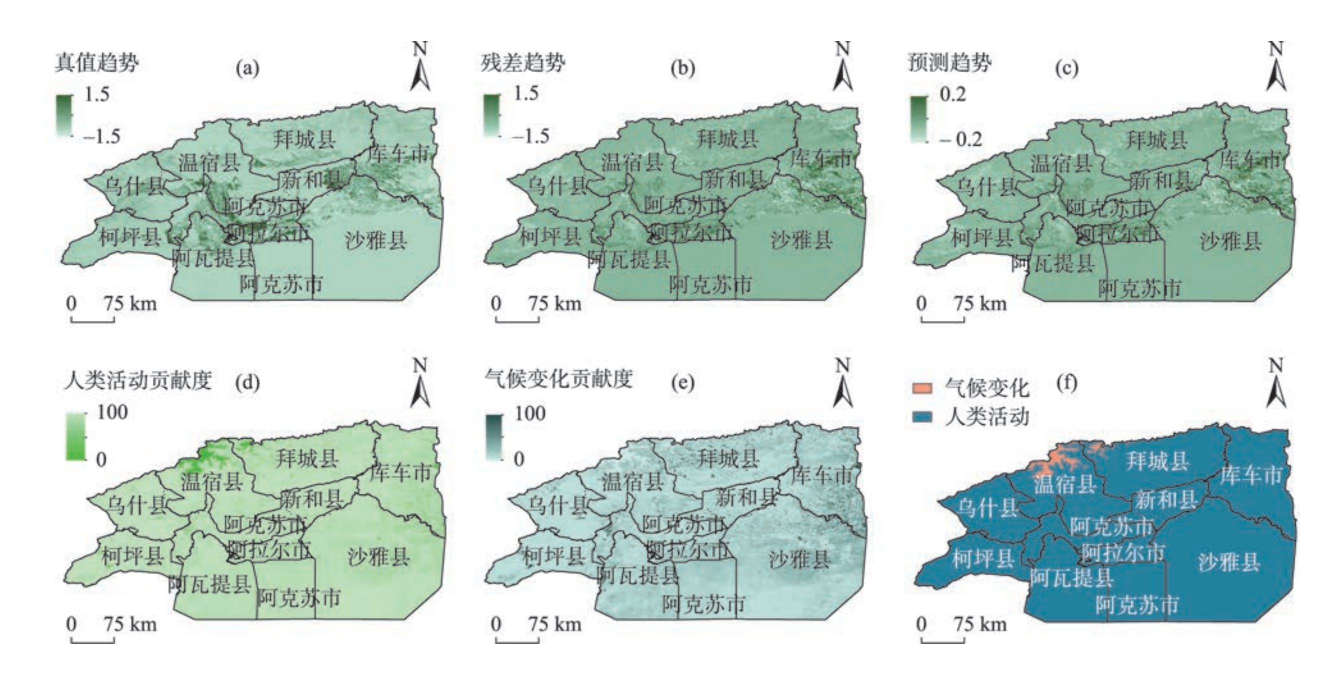


图8 VEQI真实趋势(a)、残差趋势(b)、模拟趋势(c)、人类活动贡献度(d)、气候因子贡献度(e)以及VEQI变化主要驱动因子(f)空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of real trend (a), residual trend (b), simulated trend (c), contribution of human activities (d), contribution of climate factors (e) and main driving factors (f) of VEQI change

态文明建设,走出了一条具有阿克苏特色、生态优先、绿色发展的创新之路,其中最具代表性的就是被联合国列入“全球500佳境”之一“柯柯牙绿化工程”。通过2000年和2021年柯柯牙地区Landsat系列卫星(30 m)影像显示(图9),2000年以来柯柯牙工程区及周边区域植被面积明显增加,地区“绿度”显著提升。本文基于MODIS卫星遥感数据和气象观测资料,对2000—2021年阿克苏地区植被生态质量进行了综合评估,后续研究将利用更高分辨率卫星影像资料开展更加精细化植被生态监测分析研究,为阿克苏地区乃至整个中国西北部的生态保护提供数据基础和技术支撑。

5 结 论

气候变化和人类活动双重作用下,阿克苏地区

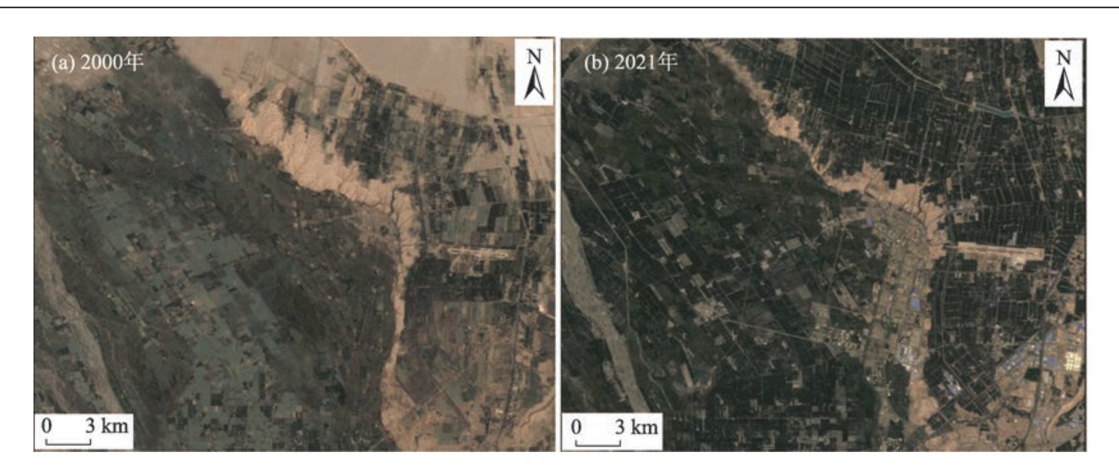


图9 2000年和2021年柯柯牙地区Landsat系列卫星真彩色对比

Fig. 9 True color map of Landsat satellite in Kokyar area in 2000 and 2021

植被生态质量正在发生变化,基于多源遥感数据以及站点观测数据,分析了阿克苏地区2000—2021年生长季5—9月植被覆盖度、NPP、VEQI等关键特征量的时空分布特征及驱动因素,主要得出如下结论:

(1) 2000—2021年阿克苏地区大部分区域的年际植被NDVI(约92%面积)、植被覆盖度(约79%面积)呈增长趋势。其中植被NDVI以$0.024\cdot(10a)^{-1}$的速率增长,植被覆盖度以$0.25\%\cdot a^{-1}$的速率增长,并在空间上表现为绿洲边缘荒漠、裸地区域缩减,植被覆盖区域明显扩张。

(2) 近22 a阿克苏地区大部分区域(约95%面积)植被NPP呈上升趋势,平均每年增长约$0.62\ g\cdot m^{-2}$,与此同时植被释氧量同样呈现持续增长的态势。增长显著区域主要位于阿拉尔市、乌什县中东部、阿瓦提县北部、温宿县南部、拜城县南部以及新和、库车和沙雅三县交界处。

(3) 近22 a在人类活动与气候变化的双重作用下,阿克苏地区大部分区域(约94%的面积)植被生态质量呈现出稳步上升趋势,平均每年增长0.17。且阿克苏地区绝大部分区域(约98%的面积)的人类活动贡献度大于气候变化的贡献度,表明阿克苏绝大部分地区的VEQI变化的主导因素为人类活动。

参考文献(References):

[1] Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, et al. The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration[J]. The Anthropocene Review, 2015, 2(1): 81−98.

[2] Chen C, Park T, Wang X, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature sustainability, 2019, 2(2): 122−129.

[3] 曹永香, 毛东雷, 薛杰, 等. 绿洲-沙漠过渡带植被覆盖动态变化及其驱动因素——以新疆策勒为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 510−521. [Cao Yongxiang, Mao Donglei, Xue Jie, et al. Dynamic changes and driving factors of vegetation cover in the oasis-desert ecotone: A case study of Cele, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 510−521.]

[4] 买吾鲁旦·阿布力克木. 塔里木河上游主要生态灾害时空分布特征及其变化趋势研究——阿克苏为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013. [Maluda Aablikem. Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ecological Hazards and Its Alleviation along the Upper Reaches of Tarim River: Case Study in Aksu[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2013.]

[5] 徐丽君, 卫琦, 徐俊增, 等.中国北方干旱区降雨与相对湿度变化趋势的非一致性研究[J].水资源与水工程学报, 2021, 32(2): 38−44. [Xu Lijun, Wei Qi, Xu Junzeng, et al. Inconsistency of the trend of rainfall and relative humidity in arid regions of northern China[J]. Chinese Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(2): 38−44.]

[6] 王菱, 谢贤群, 苏文, 等. 中国北方地区50年来最高和最低气温变化及其影响[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3): 337−343. [Wang Ling, Xie Xianqun, Su Wen, et al. Variation of the highest and lowest temperature in northern China in the past 50 years and its impact[J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(3): 337−343.]

[7] 龚春丽. 阿克苏地区土地利用变化的自然资本及生态系统服务价值核算[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2021. [Gong Chunli. Natural Capital and Ecosystem Service Value Accounting of Land Use Change in Aksu Area[D]. Alar: Tarim University, 2021.]

[8] Guo E, Liu X, Zhang J, et al. Assessing spatiotemporal variation of drought and its impact on maize yield in Northeast China[J]. Journal of Hydrology, 2017: 231−247.

[9] 方贺, 谢涛, 周育锋, 等. 基于C-2PO模型和CMOD5.N地球物

理模式函数的SAR风速反演性能评估[J]. 海洋学报, 2018, 40(9): 103-112. [Fang He, Xie Tao, Zhou Yufeng, et al. Evaluation of SAR wind speed retrieved based on C-2PO model and CMOD5.N geophysical model functions[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(9): 103- 112.]

[10] 杨雪峰, 叶茂, 木尼热·买买提. 基于WorldView-2高分影像的胡杨林结构参数获取研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1659-1667. [Yang Xuefeng, Ye Mao, Munire Maimaiti. Structural parameter acquisition of *Populus euphratica* by WorldView- 2 remote sensing image[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1659-1667.]

[11] Xu D, Yang F, Yu L, et al. Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data[J]. Journal of Cleaner Production, 2021: 128948.

[12] 赵苗苗, 刘熠, 杨吉林, 等. 基于HASM的中国植被NPP时空变化特征及其与气候的关系[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 215-225. [Zhao Miaomiao, Liu Yi, Yang Jilin, et al. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation NPP in China based on HASM and its relationship with climate[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(2): 215-225.]

[13] 贾俊鹤, 刘会玉, 林振山. 中国西北地区植被NPP多时间尺度变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5058-5069. [Jia Junhe, Liu Huiyu, Lin Zhenshan. Multi-time-scale variation of vegetation NPP in Northwest China and its response to climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5058-5069.]

[14] Liu C, Dong X, Liu Y. Changes of NPP and their relationship to climate factors based on the transformation of different scales in Gansu, China[J]. Catena, 2015, 125: 190-199.

[15] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 等. 2000—2015年青藏高原植被NPP时空变化格局及其对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2511-2527. [Chen Shuting, Guo Bing, Yang Fei, et al. Temporal and spatial variation pattern of vegetation NPP on the Qinghai-Tibet Plateau and its response to climate change from 2000 to 2015[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 2511-2527.]

[16] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 等. 1982—2010年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 15-30. [Zhou Wei, Gang Chengcheng, Li Jianlong, et al. Temporal and spatial dynamics of grassland coverage in China from 1982 to 2010 and its response to climate change[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 15-30.]

[17] 李梓钰, 陈启慧, 黄峰, 等. 吐鲁番盆地骆驼刺保护区植被覆盖度时空演变[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1104-1110. [Li Ziyu, Cheng Qihui ,Huang Feng, et al. Spatiotemporal evolution of vegetation coverage in *Alhagi sparsifolia* Reserve in Turpan Basin, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4):1104-1110.]

[18] Liu H Y, Zhang M Y, Lin Z S, et al. Spatial heterogeneity of the relationship between vegetation dynamics and climate change and their driving forces at multiple time scales in Southwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256: 10-21.

[19] 毛留喜, 李朝生, 侯英雨, 等. 2006年上半年全国生态气象监测与评估研究[J]. 气象, 2006, 32(12): 105-112. [Mao Liuxi, Li Chaosheng, Hou Yingyu, et al. National ecological meteorological monitoring and evaluation research in the first half of 2006[J]. Meteorology, 2006, 32(12): 105-112.]

[20] 毛留喜, 钱拴, 侯英雨, 等. 2006年夏季川渝高温干旱的生态气象监测与评估[J]. 气象, 2007(3): 83-88. [Mao Liuxi, Qian Shuan, Hou Yingyu, et al. Eco-meteorological monitoring and assessment of high temperature and drought in Sichuan and Chongqing in the summer of 2006[J]. Meteorology, 2007(3): 83-88.]

[21] 钱拴, 毛留喜, 侯英雨, 等. 北方草地生态气象综合监测预测技术及其应用[J]. 气象, 2008(11): 62-68. [Qian Shuan, Mao Liuxi, Hou Yingyu, et al. Comprehensive monitoring and prediction technology of ecological meteorology in northern grassland and its application[J]. Meteorology, 2008(11): 62-68.]

[22] 吴宜进, 赵行双, 奚悦, 等. 基于MODIS的2006—2016年西藏生态质量综合评价及其时空变化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1438-1449. [Wu Yijin, Zhao Xingshuang, Xi Yue, et al. Comprehensive evaluation of Tibet's ecological quality and its temporal and spatial changes based on MODIS from 2006 to 2016[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1438-1449.]

[23] 杨绘婷, 徐涵秋. 基于遥感空间信息的武夷山国家级自然保护区植被覆盖度变化与生态质量评估[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 187- 196. [Yang Huiting, Xu Hanqiu. Vegetation coverage change and ecological quality assessment in Wuyishan National nature Reserve based on remote sensing spatial information[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 187-196.]

[24] 崔灿, 郭英, 沈彦俊. 新疆荒漠植被的时空分布变化及其驱动因素[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(10): 1668-1678. [Cui Can, Guo Ying, Shen Yanjun. Temporal and spatial distribution changes of desert vegetation in Xinjiang and its driving factors[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2021, 29(10): 1668-1678.]

[25] 王志成, 刘新华, 贾付生, 等. 近10 a阿克苏流域植被覆盖时空演变特征及影响因素[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(9): 24-28, 35. [Wang Zhicheng, Liu Xinhua, Jia Fusheng, et al. Temporal and spatial evolution characteristics and influencing factors of vegetation cover in the Aksu River Basin in the past 10 years[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(9): 24-28, 35.]

[26] 钱拴, 延昊, 吴门新, 等. 植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6573-6583. [Qian Shuan, Yan Hao, Wu Menxin, et al. Dynamic monitoring and evaluation model for temporal and spatial changes of vegetation comprehensive ecological quality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6573-6583.]

[27] 曹云, 钱永兰, 孙应龙, 等. 基于MODIS NDVI的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 857-865. [Cao Yun, Qian Yonglan, Sun Yinglong, et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of forest vegeta-

tion in Southwest China and its climate response based on MODIS NDVI [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(5): 857-865.]

[28] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974. [Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation NDVI changes in China from 1982 to 2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 961-974.]

[29] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5495-5504. [Li Huixia, Liu Guohua, Fu Bojie. Responses of vegetation growth to climate change and human activities in the Three River Headwaters based on NDVI[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5495-5504.]

[30] 易浪, 任志远, 张翀, 等. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 166-174. [Yi Lang, Ren Zhiyuan, Zhang Chong, et al. The relationship between vegetation cover change and climate and human activities on the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2014, 36(1): 166-174.]

Temporal and spatial variation of vegetation ecological quality and its driving mechanism in Aksu prefecture

FANG He[1,2], YAN Peiwen[2,3], SHI Jian[2,4], KANG Juan[2], LIU Hairong[2], CHEN Dan[2], LUO Ji[2], XU Dong[5]

(1. Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310017, Zhejiang, China; 2. Aksu Prefecture Meteorological Administration, Aksu Prefecture 843000, Xinjiang, China; 3. Shaoxing Meteorological Administration, Shaoxing 312000, Zhejiang, China; 4. Zhuji Meteorological Administration, Zhuji 311800, Zhejiang, China; 5. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Under the guidance of the theory of “Two mountains”, the construction of ecological civilization has been vigorously promoted in Aksu prefecture. Today a new path of high-quality development giving priority to ecological conservation and green development with Aksu characteristics has been found in Aksu prefecture. The vegetation ecological quality information is an important index to evaluate land ecosystems. Applying remote sensing technology to research vegetation ecological quality spatiotemporal variation offers practical scientific applications for developing eco-civilization. Aksu prefecture is typical sensitive area of climate change and fragile area of vegetation ecological environment in China, thus, it has a great practical significance to study vegetation ecological status in Aksu prefecture. Combined with multi-source remote sensing data and meteorological observation data, in this paper, we explore the temporal and spatial variations of vegetation ecological quality in the growing season (from July to September) and dominant factors of climate change and human activities in Asku prefecture from 2000 to 2021. The main result of this study as follows: (1) Both of fractional vegetation cover (FVC) and net primary productivity (NPP) showed an upward trend, while the "green degree" of vegetation increased significantly in Asku prefecture from 2000 to 2020; (2) The vegetation ecological quality showed a fluctuating upward trend in Aksu from 2000 to 2020. The ecological quality of vegetation in desert and bare land area of oasis edge increased significantly; (3) The dominant factor of VEQI change in most areas of Aksu is human activities, while climate change dominates VEQI change only in a small number of areas such as the north of Wensu county. In this paper, the temporal and spatial variation of vegetation ecological quality and its driving factors in Aksu prefecture in recent 22 years were analyzed by using several vegetation ecological parameters, which could provide data base and technical support for ecological civilization construction.

Keywords: NPP; vegetation coverage; vegetation ecological quality; spatiotemporal variation; Aksu prefecture